

Lámpsakos | N° 8 | PP. 55 - 64 | julio-diciembre | 2012 | ISSN: 2145-4086 | Medellín - Colombia

## ECONOMÍA COMPUTACIONAL BASADA EN AGENTES

### AGENT-BASED COMPUTATIONAL ECONOMICS

**Msc(c) Fabián A. Giraldo Giraldo**

*Universidad Nacional de Colombia  
Medellín, Colombia*

**Ph. D. Jonatan Gómez Perdomo**

*Universidad Nacional de Colombia. Medellín,  
Colombia*

(Recibido 21/01/2012. Aprobado el 19/03/2012)

**Resumen.** El artículo tiene como objetivo mostrar varios trabajos de investigación sobre un enfoque de simulación denominado Economía computacional basada en agentes, el cual rechaza las asunciones de los enfoques de estudio tradicionales que indican que la economía es un sistema cerrado que eventualmente logra un estado de equilibrio, en el que deben realizarse supuestos de racionalidad perfecta e inversiones homogéneas para que los modelos sean tratados analíticamente. En su lugar, ve a la economía como un sistema complejo, adaptativo y dinámico. Este nuevo enfoque permite usar la simulación basada en agentes para comprender que varios agentes económicos (firmas, grupos económicos) con sus propias reglas y objetivos, son capaces de interactuar entre sí y con su entorno para obtener comportamientos emergentes que no son explicables directamente de las propiedades de los agentes individuales.

**Palabras clave:** Economía; Evolución de Reglas; Modelamiento; Simulación.

**Abstract.** This article aims to show different research that have been developed on simulation approach called, agent-based computational economics, which rejects the assumptions of traditional approaches that indicate that the economy is a closed system eventually achieves a state equilibrium, in which assumptions of rationality perfect, homogeneous investments, among others, be made to allow the models are analytically tractable, instead, sees the economy as a complex adaptive system and dynamic. This new approach allows the use of agent-based simulation for the purpose of understand how various economic agents (firms, business groups) with their own rules and objectives are able to interact with each other and with their environment, resulting emergent behaviors not end be explained directly from the properties of the individual agents.

**Keywords:** Economic, Rules Evolution, Modeling, Simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La economía evolucionista es un área del pensamiento económico que rechaza las asunciones tradicionales, las cuales indican que la economía es un sistema cerrado que eventualmente logra un estado de equilibrio en el que supuestos de racionalidad perfecta e inversiones homogéneas, entre otras, deben hacerse para permitir la tratabilidad analítica. En su lugar, ve a la economía como un sistema complejo adaptativo y dinámico que trata de comprender el comportamiento emergente del sistema macroscópico, a partir de la dinámica microscópica de cada agente (humanos, firmas, mercado, etc.). El interés principal es encontrar las condiciones o reglas en las que el comportamiento del sistema se asemeje al comportamiento real [1].

Con el fin de comprender los comportamientos emergentes en los sistemas económicos, se han desplegado trabajos de investigación. Entre los enfoques propuestos, se encuentra la utilización de la simulación basada en agentes para configurar a los agentes diferentes estados, reglas y conductas, con el propósito de experimentar diversos escenarios del sistema y entender los comportamientos globales emergentes que surgen de las interacciones locales repetidas de agentes que buscan su beneficio particular.

Otras aproximaciones utilizan agentes integrados con algoritmos heurísticos y aprendizaje de máquina, con el objeto de evolucionar el comportamiento de los agentes en los sistemas económicos, de tal forma que se adapten al ambiente, a través de la evolución de reglas y estrategias.

El presente artículo tiene como objetivo mostrar los fundamentos básicos de la economía computacional basada en agentes y ver cómo los sistemas económicos son vistos como conocimiento basado en reglas que evolucionan en el tiempo y que pueden ser simulados en ambientes computacionales, en los cuales los agentes tienen la capacidad de adaptarse al ambiente con procesos de aprendizaje y evolución de reglas de comportamiento.

El artículo está organizado de la siguiente forma: la sección dos provee los elementos principales de la simulación de sistemas complejos; la sección tres presenta los elementos fundamentales de la economía computacional basada en agentes. En la sección cuatro se presenta la perspectiva de un siste-

ma económico como un proceso de conocimiento desde un enfoque macro, micro, y el enfoque maso. La sección cinco muestra trabajos de investigación relacionados con proceso de evolución de reglas y estrategias; en la sección seis se muestran plataformas de simulación basadas en agentes; por último, se las conclusiones.-

## 2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS COMPLEJOS

En años recientes la ciencia de la complejidad ha sido reconocida por múltiples académicos en disciplinas científicas como la física, la economía, las ciencias de la computación y ciencias sociales, por su capacidad para modelar sistemas no lineales [2]. Dicha ciencia, estudia los sistemas como un conjunto de componentes interconectados cuyo comportamiento no es explicable exclusivamente por las propiedades de los mismos, más bien, el comportamiento emerge de los componentes interconectados. Con el objeto de modelar los sistemas complejos, se han desarrollado paradigmas de modelamiento y simulación entre los que se encuentran la dinámica de sistemas [3] y la simulación basada en agentes [4].

La simulación basada en agentes es un paradigma de modelamiento que se caracteriza por comprender que varios agentes (autónomos, heterogéneos e independientes), con sus propias metas y objetivos, son capaces de realizar interacciones entre sí y con su entorno. Para el caso particular de esta revisión, el objetivo de la simulación basada en agentes es tratar de inferir las propiedades globales de todo el sistema o identificar los patrones de comportamiento emergentes a partir de las reglas que determinan el comportamiento individual de los agentes. El comportamiento global del sistema no es abstraído sino que emerge del proceso de inferencia cuando se ejecuta el modelo [4].

Un escenario de interés particular en el cual la simulación basada en agentes es utilizada es la economía computacional, un área del pensamiento económico que rechaza los supuestos tradicionales que indican que la economía es un sistema cerrado que eventualmente logra un estado de equilibrio y en la que supuestos de racionalidad perfecta, inversiones homogéneas, entre otros, deben hacerse para permitir el análisis matemático [5]. En su lugar, esta área del pensamiento ve la economía como un sistema complejo adaptativo y dinámico que trata de comprender el comportamiento emergente del sistema macros-

cópico, a partir de la dinámica microscópica de cada agente (humanos, firmas, mercado, etc.) [6], [7].

Existen características que sustentan por qué la economía puede ser vista como un sistema complejo adaptativo; entre ellas, se encuentran en [8]: las interacciones entre agentes heterogéneos son dispersas, no hay controlador global activo; la coordinación emerge por mecanismos de competencia y coordinación entre agentes; existe una organización jerárquica que permite comunicarse con unidades económicas de diferente nivel; los agentes computacionales, tal como sucede en el mundo real, se adaptan continuamente como producto de la experiencia acumulada; los agentes continuamente innovan con las regularidades que logran abstraer del mundo en el que actúan. Por último, los agentes actúan fuera del equilibrio dinámico, es decir, los agentes, por su interacción, mejoran constantemente las acciones en un ambiente económico.

### 3. ECONOMÍA COMPUTACIONAL BASADA EN AGENTES

Las economías son sistemas dinámicos complejos en los que los agentes interaccionan en el contexto local y dan lugar a regularidades globales, tales como: tasa de empleo y crecimiento, distribución de ingreso, tasas de desempleo, tasas de inflación, etc. Estas regularidades globales, a su vez, retroalimentan la determinación de las interacciones locales [9], [10].

La economía computacional basada en agentes (ACE) estudia los procesos económicos modelados como sistemas dinámicos de agentes que interactúan. Ejemplos de posibles agentes incluye: individuos (consumidores, trabajadores), grupos sociales (familias, firmas, agencias gubernamentales), instituciones (sistemas reguladores del mercado), entidades biológicas (cultivos, ganados, bosques) y entidades físicas (infraestructura, clima y regiones geográficas) [11].

La investigación actual sobre ACE está encaminada hacia los siguientes aspectos: 1). Comprensión empírica: porque particularidades globales evolucionan y persisten a pesar de la ausencia de control y planificación centralizada; 2). Comprensión normativa: determinar cómo pueden utilizarse los modelos basados en agentes como laboratorios para el descubrimiento de buenos diseños económicos. El objetivo

es evaluar propuestas de diseños de políticas económicas, instituciones, procesos y cómo son deseables socialmente en el tiempo; 3). Visión cualitativa y generación de teorías: cómo pueden comprenderse los sistemas económicos más plenamente a través de un examen sistemático de los comportamientos dinámicos potenciales en condiciones iniciales especificadas [11].

Sin embargo, existen líneas de investigación bien definidas en el campo de la economía computacional basada en agentes, entre las que se destacan [10], [12]:

**Aprendizaje:** la idea principal es buscar cómo modelar la mente de los agentes computacionales. Los investigadores en ACE han usado un amplio rango de algoritmos para los procesos de aprendizaje en los agentes. Entre los principales algoritmos se encuentran: aprendizaje por refuerzo [13], redes neuronales [14], algoritmos genéticos [15], programación genética [16] y otros algoritmos de computación evolutiva que permiten capturar aspectos de aprendizaje inductivo.

**Evolución de normas de comportamiento:** se trata de estudiar la evolución de la cooperación, a pesar de que el engaño produce ganancias inmediatas. La idea es estudiar qué papel juegan la reputación, la confianza, la reciprocidad, la venganza, el rencor y el castigo en juegos.

**Formación de redes económicas:** estudiar la manera en la que las interacciones en las redes económicas están determinadas por escoger de forma deliberada de los socios. Una de las preocupaciones clave en esta tarea, es la aparición de redes de comercio de compradores y vendedores que determinan sus socios de forma adaptativa, sobre la base de experiencias pasadas.

**Modelamiento y organizaciones:** estudia la manera de definir una estrategia óptima para alcanzar las metas específicas.

**Laboratorio computacional:** un laboratorio computacional es un entorno de trabajo preconstruido, con una interfaz gráfica que permite realizar experimentaciones en un dominio específico para estudiar sistemas de múltiples agentes que interactúan por medio de ejercicios computacionales controlados y replicables [17]. Entre los temas de investigación para la construcción de laboratorios computacio-

nales se encuentran: construcción de laboratorios computacionales para cada aplicación, construcción de plataformas computacionales multifacéticas, mecanismos para hacer validaciones de resultados con datos obtenidos por otras fuentes.

Adicionalmente, un aspecto relevante que se debe considerar en los laboratorios computacionales es conocer con qué grado de flexibilidad pueden ser especificados los esquemas de aprendizaje para los agentes en laboratorios computacionales; a pesar de que muchos estudios tienden a realizar sus algoritmos de aprendizaje en forma de simples ecuaciones de actualización con parámetros fijos, la evidencia acumulada indica que esos algoritmos no funcionan bien en todas las situaciones. Un mejor camino para proceder es permitir que los agentes aprendan a aprender en los laboratorios computacionales.

#### 4. MESO, MACRO Y MICRO REGLAS

En [18], [19], [20], [21] se presenta un entorno de trabajo analítico en el ámbito de la economía evolutiva con una arquitectura micro, meso y macro. La idea central es definir un sistema económico como una población de reglas, una estructura de reglas y un proceso de reglas. El nivel meso se concibe como el conjunto de reglas que gobiernan los sistemas, es decir, un sistema económico basado en reglas está contenido en el meso. El nivel micro se refiere a los individuos portadores de reglas y el sistema que organizan. El nivel macro consiste en la población de estructuras de los sistemas de meso; en otras palabras, indica el orden o la coordinación entre las poblaciones de reglas o unidades meso. El resultado final que proponen es un marco de trabajo coherente para el análisis ontológico de la evolución económica, en el que los cambios en el meso dominio implican entender los micro procesos y las macro consecuencia involucradas.

Para explicar el entorno de trabajo, parten de la discusión que los métodos tradicionales que exponen los procesos económicos, realizan supuestos para permitir la tratabilidad analítica e indican que dicha aproximación está basada en tratamientos algebraicos que suponen que una actitud verdaderamente científica y filosófica de la economía debe estar apoyada en la contemplación de la lógica matemática. La expresión natural de dicho tratamiento algebraico en economía es la sobreposición de proposiciones formales micro-económicas, en la cual es necesario idealizar estados

estáticos para deducir consecuencias macroscópicas. A partir de lo anterior, proponen una manera de pensar diferente sobre las cuestiones fundamentales de la coordinación, el cambio de la economía y adaptan la perspectiva que la evolución económica es un crecimiento de procesos de conocimiento. Como consecuencia directa, indican que un sistema económico puede ser visto como una estructura compleja de reglas que evolucionan sobre un largo periodo de tiempo. El proceso por el cual nuevas reglas son originadas, adaptadas y difundidas en un sistema económico, constituye la fuerza motriz de la economía evolucionista.

El punto esencial para comprender este nuevo enfoque es que el nivel macro no es un comportamiento de agregación de los micro, elemento considerado en las interpretaciones tradicionales, sino, más bien, que ofrece una perspectiva del sistema meso visto como un conjunto, del mismo modo, micro no es la esencia reducida de un sistema económico, mirándolo de abajo hacia arriba, sino que debe ser entendido desde la perspectiva meso, cuando éste es visto en términos de sus partes constituyentes.

El crecimiento del conocimiento tiene aspectos relacionados con la micro organización de reglas y los aspectos macro asociados con la estructura de la población de reglas, pero últimamente la evolución económica ha sido vista como un proceso en el cambio de reglas y del sistema de reglas. Es decir, el meso cambio es el núcleo de la evolución económica y la dinámica meso es llamada la meso trayectoria. Una meso trayectoria puede ser vista como un proceso de tres fases: creación (emergencia), difusión (adaptación y adopción) y retención (mantenimiento) de una regla de un sistema económico. En la fase de creación, cada agente desarrolla una idea/regla que conduce al diseño de una nueva organización de personas, energía, materiales. En esta fase hay ideas y reglas, pero muchas de ellas no son viables. La fase de difusión involucra la adopción y adaptación de las reglas viables en el mundo de los contextos organizacionales. Así se encuentra una nueva organización micro y un meso orden en la economía que se evidencia en el mercado y estructura organizacional industrial.

#### 5. EVOLUCIÓN DE REGLAS Y COMPORTAMIENTOS

La tarea del descubrimiento de reglas ha sido abordada desde diversos paradigmas: construcción de

árboles de decisión, aprendizaje inductivo y, recientemente, redes neuronales, algoritmos evolutivos [22], técnicas de co-evolución [23] y [24], programación genética [25] y programación genética gramatical [26].

A continuación, se presentan trabajos de investigación en el campo de la simulación basada en agentes que permite visualizar distintos enfoques de evolución de reglas de comportamiento de agentes económicos.

Clemens Van Dinther en [27], expone modelos de aprendizaje que pueden ser integrados en simulaciones económicas basadas en agentes con el fin de modificar el conjunto de reglas que poseen los agentes. Entre los métodos mencionados están: los algoritmos genéticos, técnicas de aprendizaje reforzado y redes neuronales vistas como sistemas clasificadores.

Un algoritmo genético puede ser comprendido como un modelo de interacción estratégica, es decir, que el agente debe tratar de buscar la mejor estrategia en un ambiente determinando. Por lo tanto, los algoritmos genéticos pueden ser asumidos como modelos de aprendizaje social (aprendizaje por interacción). Otra de las técnicas utilizadas es el aprendizaje reforzado, cuyo objetivo es que los agentes aprenden de los pagos recibidos por acciones pasadas.

Bell A en [13], propone un sistema de aprendizaje reforzado de reglas en un juego repetitivo. La idea principal es ver que los agentes aprenden de la interacción con su ambiente. Los agentes, en este enfoque, asocian premios con acciones sobre la base de acciones pasadas y luego trasladan esos premios en probabilidades para tomar esas acciones en un futuro. Dicha aproximación es adaptada en aprendizaje basado en agente en el contexto de los juegos, se presenta el problema del Farol o problema del bar Santafé, en los que los agentes (no existe proceso de comunicación) deben decidir si ir o no ir al bar y, de acuerdo con la cantidad de agentes, se abre o no el bar, por lo tanto, reciben un pago por la acción tomada en un instante de tiempo. Los resultados presentados evidencian la rápida convergencia del aprendizaje reforzado al comportamiento promedio agregado de los agentes, cuando los contrincantes son adaptativos.

Shu-Heng Chen en [16], presenta varios casos de aplicación del uso de la programación genética y

programación genética gramatical en economía computacional basada en agentes. Entre los trabajos mencionados por el autor se encuentran: el desarrollado por Duffy y Engle-Warnick, en el que se usa programación genética para inferir estrategias en experimentos de decisión económica específicamente. Fue aplicado para la evolución de estrategias en el juego económico Ultimátum; los resultados obtenidos muestran la capacidad del algoritmo para generar reglas de decisión que permiten vencer al contrincante.

Robert Axelrod en [28], propone el uso de algoritmos genéticos para evolucionar estrategias en el dilema del prisionero iterado. Planteó la utilización de esquemas de codificación binaria tomando en consideración juegos previos y, a partir de esta información, obtener reglas que especifican la acción que se ha de tomar. Las estrategias obtenidas como producto de la evolución son similares a TIC FOR TAC; es decir, que existe cooperación mutua y castigo por desertión. El esquema propuesto por Axelrod fue usado posteriormente por Errity A en [29]; sin embargo, este último realizó una modificación en la codificación de los tres primeros movimientos con el fin de utilizar movimientos previos de las jugadas, en lugar de jugadas aleatorias pre-configuradas.

Nelis F et al en [30], [31] presentan la aplicación de técnicas de coevolución basados en Particle Swarm Optimization (PSO) para evolucionar estrategias en el dilema del prisionero iterado y se usan tres diferentes técnicas de coevolución: una red neuronal entrenada con PSO, que se utiliza para predecir la próxima acción para ejecutar, un enfoque binario del PSO en el que la partícula representa una estrategia de juego completa y, finalmente, un enfoque que explora las estructuras simétricas de las estrategias creadas por los humanos. Los resultados experimentales indican que el enfoque de redes neuronales es capaz de inducir altos niveles de cooperación; sin embargo, en algunas ocasiones, podrían conducir a colapsos catastróficos por el despliegue de estrategias débiles.

Floortje Alkemade en [32], presenta varios modelos entre los cuales se encuentran: el oligopolio de Cournot, que tiene como objetivo modelar la búsqueda y aprendizaje del comportamiento de agentes económicos. También presenta un ambiente de simulación de duopolio de Cournot, donde los agentes toman decisiones, hacen suposiciones de las estrategias del otro agente en el mercado. En este caso hacen



uso de un modelo de coevolución, en el cual cada firma tiene su población de estrategias y un algoritmo genético es aplicado en cada una de las firmas por separado. Los resultados indican que existe una convergencia hacia el equilibrio competitivo.

Por último, presentan el uso de algoritmos genéticos para la difusión de información sobre una red social, con el fin de que las firmas puedan aprender acerca de la estructura de la red y las características del consumidor cuando la información habilitada es limitada. Se usa esta información para evolucionar estrategias de marketing satisfactorias. Presentan como caso la aplicación y el problema de decisión de una firma para seleccionar la estrategia publicitaria e introducir con éxito un nuevo producto en una red de consumidores [33].

Thomas Riechmann en [34], presenta la aplicación de los algoritmos genéticos en el modelamiento y análisis de procesos de aprendizaje económico por medio de simulaciones por computador. En su estudio muestra la aplicación de la economía computacional para el modelamiento de problemas económicos, específicamente, de un modelo de monopolios regionales cuyo objetivo es determinar la cantidad de bien para producir en una región y maximizar los beneficios. Los resultados obtenidos por los algoritmos genéticos permiten conocer a las firmas cuánto producir y ofertar para la venta. Como conclusión final, luego del experimento, se indica que los algoritmos genéticos pueden ser utilizados como mecanismos de aprendizaje de estrategias en problemas económicos.

Ralf Herbrich et al en [36], hacen un acercamiento a la aplicación de las redes neuronales en la economía. En el campo de la simulación basada en agentes, las redes neuronales pueden ser consideradas como agentes que aprenden dependencias de su ambiente y, por lo tanto, infieren estrategias de comportamiento basado en un número limitado de observaciones.

Entre las aplicaciones de las redes neuronales en la economía, mencionan: la clasificación de agentes económicos (clientes, compañías), la predicción de series de tiempo y el modelamiento de procesos de aprendizaje de agentes adaptativos artificiales con racionalidad limitada.

En el caso del modelamiento de procesos de aprendizaje, Thomas Sargen en [35], propone un trabajo en el que las neuronas de la red son interpretadas como agentes, quienes actualizan su percepción del

ambiente de acuerdo con la información que reciben; sus decisiones (salidas de las neuronas) ejercen una influencia sobre el ambiente que, al tiempo, retroalimenta al agente.

Francesco Luna en [14], se concentra en el problema del rol de las instituciones en un proceso de aprendizaje en agentes económicos. En este trabajo se utiliza una red neuronal para modelar el proceso de aprendizaje, y se utiliza un algoritmo genético para obtener los pesos en esta red de la mejor forma posible para optimizar el aprendizaje.

Harald y Fogel en [21] evolucionaron estrategias en el dilema del prisionero iterado con perceptores multicapa Feedforward. Todas las redes juegan con otras en una competición todos contra todos, los juegos duraban 151 movimientos y la medida de rendimiento usada fue el promedio de los pagos obtenidos en los movimientos. Luego, las redes fueron ordenadas de acuerdo con la medida de rendimiento y las mejores (mitad), fueron seleccionadas para ser padres en la siguiente generación. Los resultados obtenidos indican que para converger en las estrategias buscadas se requieren muchas generaciones para obtener estrategias con tendencia a cooperar.

Richard Lum et al en [37], hace uso de NEAT (Neuroevolution of Augmenting Topologies) para entrenar un jugador para el dilema del prisionero iterado. NEAT es una técnica de evolución de redes neuronales basado en algoritmos genéticos, en la que se puede evolucionar la topología de la red y los pesos de las conexiones.

Para realizar el modelamiento indica que el proceso de adaptación a las estrategias variadas del oponente debe usar la historia de movimientos anteriores. En el caso puntual de este trabajo se observaron los últimos cinco movimientos, tanto del contrincante como los propios.

Para la obtención de la medida de rendimiento (*fitness*), de cada una de las redes neuronales se planteó un torneo igual al de Axelrod [26] cuando evolucionó estrategias con algoritmos genéticos, pero en este caso se consideraron las siguientes estrategias: TIC FOR TAC, TIC FOR TWO TAC, Always cooperate, Always defect. Los resultados obtenidos indican que las redes neuronales obtenidas se adaptaban a las estrategias de los contrincantes puesto que se obtenían buenos pagos en cada uno de los enfrentamientos.

Existen otros juegos no cooperativos que han sido objeto de estudio, Browning et al en [38], presentan un algoritmo genético para estudiar la evolución del comportamiento social en juegos repetitivos como juego de la gallina, la batalla de los sexos, caza del ciervo. Los resultados muestran la emergencia de la cooperación cuando existe reciprocidad en los juegos dilema del prisionero y el juego de la gallina.

## 6. PLATAFORMAS DE MODELAMIENTO PARA SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

Chris Langton, Nelson Minar y Roger Burkhard en [39], desarrollan el sistema de simulación Swarm, un conjunto de herramientas para la simulación de sistemas multigente.

Entre los trabajos destacados en el ámbito de la economía computacional, se encuentran: el modelamiento basado en agentes para la evolución de sistemas eco-industriales, la meta del estudio es analizar las condiciones de sostenibilidad, es decir, conocer en qué momento los recursos se agotan. K. Cao et al en [40], presentan como caso de estudio un modelo de un parque eco-industrial para la industria química implementado en el entorno de simulación basado en agentes Swarm. Otro de los trabajos, en [41] es un modelo que ilustra la emergencia y difusión de los estándares de software. La pregunta práctica para responder en este esquema consiste en cuantificar los beneficios de la estandarización.

El Departamento de inteligencia artificial de la Universidad de Wurzburg desarrolla SeSam (Shell for Simulated Agent Systems), el cual es definido como un ambiente genérico para modelar y experimentar con sistemas basados en agentes [42]. SeSam ha sido utilizado para la evolución de sociedades, para ello, integraron en los agentes la capacidad para evolucionar sus reglas de comportamiento con algoritmos genéticos y buscar los mejores parámetros en gráficos parametrizados de actividad [43].

Uri Wilensky en [44], [45], toma las características de StartLogoT (Evolución de StartLogo) y diseña NetLogo: un ambiente de programación multiagente multiplataforma para la simulación de fenómenos complejos que evolucionan con el tiempo. Fue diseñada como plataforma educativa e investigativa y es ampliamente usada en varias disciplinas.

El grupo de Ciencias sociales de la Universidad de Chicago desarrollan RePast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) [46], que es un entorno de trabajo extensible para la simulación de agentes. Entre los trabajos de este entorno, se encuentra la construcción de un laboratorio computacional basado en agentes para ensayar la solvencia económica de la venta al por mayor en mercados eléctricos diseñados. La idea de este laboratorio es probar en qué medida el mayorista (Wholesale Power Market Platform) es capaz de mantener el mercado ordenado y eficiente en el tiempo, a pesar de los intentos de los participantes en el mercado por obtener una ventaja individual a través de precios estratégicos [47], [48] [49].

Andrew Begel, en 2004, propone una extensión de StartLogo, al que denomina StartLogo TNG (The Next Generation) [50], que provee dos significativos avances con respecto a su versión previa. Primero, la programación es realizada con bloques de programación gráfica en lugar de comandos basados en texto y, segundo, habilita la representación 3D de los agentes en el mundo.

## 7. CONCLUSIONES

A partir de la presentación de las perspectivas que son involucradas en economía computacional basada en agentes, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

El modelamiento de un sistema económico, como un sistema complejo adaptativo, permite descubrir nuevos patrones emergentes de la interacción de agentes económicos individuales que actúan en un ambiente, debido a que se omiten los supuestos tradicionales para permitir tratabilidad analítica. En muchos procesos cotidianos tener un conocimiento de las relaciones globales entre conceptos limita los procesos de simulación puesto que, generalmente, se conocen los comportamientos individuales de los agentes involucrados, lo que significa que éste es un elemento clave de la simulación basado en agentes y se pueden buscar explicaciones de procesos globales en sistemas económicos con poca información.

La integración de paradigmas de simulación basada en agentes, economía y técnicas como: algoritmos evolutivos y aprendizaje reforzado, permite que los agentes en un proceso de simulación puedan descubrir las reglas individuales y de interacción que llevan

a un sistema económico a una situación particular. Se podrían inferir fallas, políticas y estrategias que se deberían tener en los agentes para lograr un comportamiento global buscado. Lo anterior permitiría visualizar la economía evolutiva desde una perspectiva micro, meso y macro.

Se requieren plataformas de modelamiento de sistemas basados en agentes, que tengan como núcleo fundamental mecanismos de evolución (adaptación) de comportamiento de los agentes, con el uso de estrategias evolutivas y técnicas de aprendizaje de máquina, en los cuales modeladores (economistas) con un lenguaje simple puedan simular diferentes procesos, con el fin de explicar por qué ciertos comportamientos económicos permanecen en el tiempo, a pesar de que no exista control y planificación centralizada para simular nuevos escenarios económicos y evaluar propuestas de políticas socialmente aceptables.

## REFERENCIAS

- [1] K. Dopfer, J. Foster, J. Potts. "Micro-meso-macro", *Journal of Evolutionary Economics*, no. 14, pp 263-279, 2004.
- [2] C.M. Macal, M.J. North, "Agent-based modeling and simulation", *Winter Simulation Conference*, pp. 86-98, 2009.
- [3] L.R Izquierdo, J.M Galan, J.I Santos, "Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas", *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales* 1, no. 16, 85-112, 2008.
- [4] H. Scholl, "Agent based and system dynamics modeling: A call for cross study and joint research", *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-34)-Volume 3*, IEEE Computer Society, pp. 3003, 2001.
- [5] K. O. Faxen, "An evolutionary theory of economic change", *Journal of Economic Behavior & Organization* 6, no. 1, 92-94, 1985.
- [6] M. Fontana, "Can neoclassical economics handle complexity? the fallacy of the oil spot dynamic", *Journal of Economic Behavior & Organization* 76, no. 3, 584-596, 2010.
- [7] Richard R. Nelson and Sidney G. Winter, "Evolutionary theorizing in economics", *Journal of Economic Perspectives* 16, no. 2, 23-47, 2002.
- [8] Y. Chen, X. Su, J. Rao, H Xiong, "Agent-based microsimulation of economy from a complexity perspective", 2000.
- [9] D.F. Batten, "Discovering artificial economics", Westview Press, 2000.
- [10] L. Tesfatsion, "Agent-based computational economics", *ISU Economics Working Paper*, 2003.
- [11] L. Tesfatsion, "Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory", *Handbook of Computational Economics*, vol. 2, Elsevier, pp. 831-880, 2006.
- [12] L. Tesfatsion, "Agent-based computational economics: Modeling economies as complex adaptive systems", *Staf general research papers*, Iowa State University, Department of Economics, 2008.
- [13] A. M. Bell, "Reinforcement learning rules in a repeated game", *Computational Economics*, pp 89-110, 2001.
- [14] F. Luna, "Computable learning, neural networks and institutions", *Tech. report*, 1996.
- [15] Dawid H, "Adaptive learning by genetic algorithms: Analytical results and applications to economic models", 1st ed., Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 1999.
- [16] S.Chen, "Fundamental issues in the use of genetic programming in agent-based computational economics", *working paper*, ai-econ research, 2001.
- [17] Y. Shun-kun, Y. Jia-hai, "Agent-based computational economics: methodology and its application in electricity market research", *Power Engineering Conference*, 2005. IPEC 2005. The 7th International, 2005.
- [18] K. Dopfer, "The economic agent as rule maker and rule user: Homo sapiens oeconomicus", *Journal of Evolutionary Economics* 14 (2004), no. 2, 177-195.
- [19] K. Dopfer, J. Foster, J. Potts, "Micro-meso-macro", *Journal of Evolutionary Economics* 14 (2004), no. 3, 263-279.
- [20] K. Dopfer, J. Potts, "Evolutionary realism: a new ontology for economics", *Journal of Economic Methodology* 11 (2004), no. 2, 195-212.
- [21] J.S. Metcalfe, J. Foster, "Evolution and economic complexity", 2004.
- [22] G Pappa, A. Freitas, "Automatically evolving rule induction algorithms tailored to the prediction of postsynaptic activity in proteins", *Intell. Data Anal.* 13, no. 2, pp. 243-259, 2009.



- [23] S Yew and C. Xin, "Multiple Choices and Reputation in Multiagent Interactions", *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions, 2007
- [24] Y. Yau and J. Teo, "An Empirical Comparison of Non-Adaptive, Adaptive and Self-Adaptive Co-evolution for Evolving Artificial Neural Network Game Players". 2006 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS 2006), pp. 405-410, Bangkok, Thailand, 2006.
- [25] D. Rivero, J. Dorado, J. Rabunal, A. Pazos, "Generation and simplification of Artificial Neural Networks by means of Genetic Programming", *Neurocomputing*, Brazilian Symposium on Neural Networks (SBRN2008), No. 73, Issues 16-18, pp. 3200-3223, 2010
- [26] I. Tsoulos, D. Gavrilis, E. Glavas, "Neural network construction and training using grammatical evolution", *Neurocomputing*, Machine Learning for Signal Processing (MLSP 2006) / Life System Modelling, Simulation, and Bio-inspired Computing (LSMS 2007). No 72, Issues 1-3, pp. 269-277, 2008
- [27] D. Clemens, "Agent-based simulation for research in economics", *Handbook on Information Technology in Finance*, International Handbooks on Information Systems, Springer Berlin Heidelberg, pp. 421-442, 2008.
- [28] M. Melanie, "An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems)", third printing ed., A Bradford Book, 1998.
- [29] A. Errity, "Evolving strategies for the prisoner's dilemma", July 2003.
- [30] N. Franken, A.P. Engelbrecht, "Particle swarm optimization approaches to coevolve strategies for the iterated prisoner's dilemma", *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on 9, 2005
- [31] N. Franken, A.P. Engelbrecht, "Pso approaches to coevolve ipd strategies", *Evolutionary Computation*, 2004.
- [32] F. Alkemade, "Evolutionary agent-based economics", Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- [33] F Alkemade, H La Poutre, H Amman, "On social learning and robust evolutionary algorithm design in economic games", *Evolutionary Computation*, 2005. The 2005 IEEE Congress on, No. 3, pp. 2445 -2452, sept. 2005.
- [34] T. Riechmann, "Learning in economics: Analysis and application of genetic algorithms", Springer, 2001
- [35] R. Herbrich, M. Keilbach, T. Graepel, P. Bollmann-Sdorra, K. Obermayer, "Neural networks in economics: Background, applications and new developments", in *Advances in Computational Economics: Computational Techniques for Modelling Learning in Economics*, Kluwer Academics, pp. 169-196, 1999.
- [36] C. In-Koo, "Bounded rationality, neural network and folk theorem in repeated games with discounting", *Economic Theory* 4, pp. 935-957, 1994.
- [37] R Lum, M Meighan, H Alfaro, "Using neat to train a player for the iterated prisoner dilemma", *Machine Learning FALL*, 2008.
- [38] L Browning, A Colman, "Evolution of coordinated alternating reciprocity in repeated dyadic games", *Journal of Theoretical Biology*, pp. 549-557, 2004.
- [39] N. Minar, R. Burkhart, C. Langton, M Askenazi, "The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations", *Working papers*, Santa Fe Institute, 1996.
- [40] K. Cao, X. Feng, H Wan, "Applying agent-based modeling to the evolution of eco-industrial systems", *Ecological Economics*, 2009.
- [41] T. Stockheim, M. Schwind, and W. Konig, "A model for the emergence and diffusion of software standards", *System Sciences*, Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on, 2003.
- [42] C. Triebig, T. Credner, F. Kigl, P. Fischer, T. Leskien, A. Deppisch, S. Landvogt, "Simulating automatic high bay warehouses using agents", *Multi-Agent Systems and Applications IV*, Lecture Notes in Computer Science, No. 3690, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 653-656.
- [43] O. Christoph, A. Hornlein, F. Klugl, "Evolutionary optimization of societies in simulated multi-agent systems", 2000.
- [44] S. Tisue and U. Wilensky, "NetLogo: a simple environment for modeling complexity", 2004.
- [45] P. Blikstein, D. Abrahamson, U. Wilensky, "Netlogo: Where we are, where we're going", In *Proceedings of the annual meeting of Interaction Design and Children*, Press, 2005.

- [46] A. T. Crooks, "The repast simulation/modelling system for geospatial simulation", 2007.
- [47] D. Koesrindartoto, Junjie Sun, and L. Tesfatsion, "An agent-based computational laboratory for testing the economic reliability of wholesale power market designs", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, June 2005, pp. 2818-2823 Vol. 3.
- [48] S. Widergren, J. Sun, and L. Tesfatsion, "Market design test environments", Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 0-0 2006, p. 6 pp.
- [49] K. Boer-Sorban K, "Agent-Based Simulation of Financial Markets: A Modular, Continuous-time Approach", Doctoral Thesis, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2008
- [50] E Klopfer, H. Scheintaub, "StarLogo TNG: science in student-programmed simulations". In Proceedings of the 8th international conference on International conference for the learning sciences (ICLS'08), No. 3. International Society of the Learning Sciences 59-60, 2008.